

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский государственный лесотехнический университет»
(УГЛТУ)

Кафедра энергетики

Ю.В. Путилин
С.В. Звягин
А.И. Сафронов

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА В ПУЧКЕ ТРУБ

Учебно-методическое пособие к лабораторной работе №15 по курсу
«Теплотехника» для студентов очного и заочного обучения всех
специальностей

Екатеринбург
2020

Печатается по рекомендации методической комиссии ИАТТС

Протокол № 1 от 30.10.2019 г.

Рецензент – профессор, доктор техн. наук С.М. Шанчуров

Редактор Л. Д. Черных

Оператор компьютерной верстки Е. Н. Дунаева

Подписано в печать 27.01.2020		Поз. 48
Плоская печать	Формат 60x84 1/16	Тираж 10 экз.
Заказ №	Печ. л. 0,70	Цена руб. коп.

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ

Сектор оперативной полиграфии РИО УГЛТУ

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В рекуперативных теплообменных аппаратах осуществляется теплоотдача от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую их стенку труб. Один теплоноситель протекает внутри труб, скомпонованных в виде пучка, другой – в межтрубном пространстве. Процесс теплообмена между любым теплоносителем и стенкой называется теплоотдачей.

Интенсивность теплоотдачи характеризуется коэффициентом теплоотдачи α , Вт/(м² · К), который показывает величину теплового потока через поверхность теплообмена площадью 1 м² при разности температур поверхности и жидкости в 1⁰. Его величина зависит от большого числа факторов – режима движения, скорости и теплофизических параметров жидкости, формы и размеров теплообменной поверхности.

Характерной особенностью поперечного обтекания труб является отрыв потока от поверхности трубы и образование вихрей (рис. 1). Картина омывания поверхности существенно зависит от взаимного расположения труб в пучке: шахматного или коридорного (рис. 2). Трубы первого ряда обоих пучков омываются одинаково (рис. 1): на лобовой поверхности образуется пограничный слой, толщина которого по мере перемещения жидкости к экватору трубы постепенно возрастает. Около экватора этот слой отрывается от поверхности и уносится потоком.

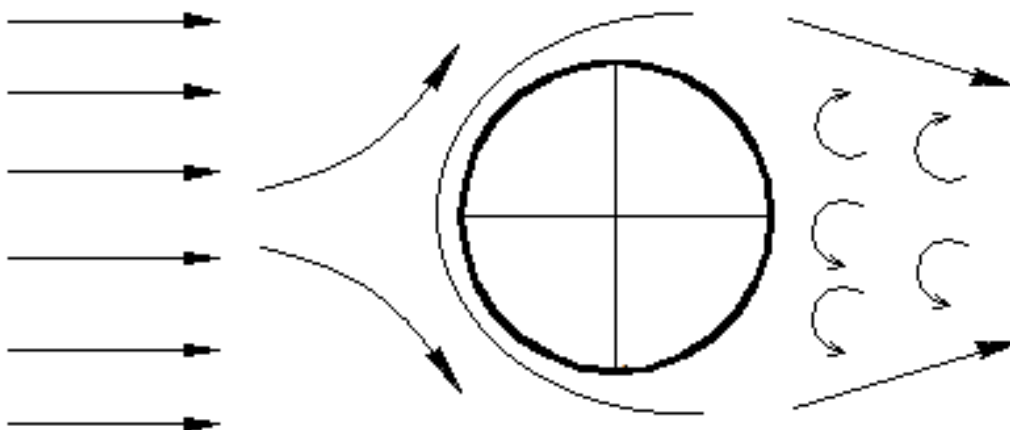


Рис. 1. Обтекание одиночной трубы

В кормовой части трубы стенка омывается возникающими вихрями, которые непрерывно смешиваются с основным потоком. Интенсивность теплоотдачи по периметру трубы определяется характером омывания, поэтому коэффициент теплоотдачи имеет максимальное значение в

лобовой точке, постепенно уменьшаясь за счет увеличения толщины пограничного слоя.

После отрыва пограничного слоя от поверхности коэффициент теплоотдачи снова возрастает за счет образования вихревой зоны. Однако лобовая часть второго и последующих рядов затеняется впереди расположенными трубами, в результате чего омывается с меньшей интенсивностью. Начиная с третьего ряда, устанавливается режим, характерный для данной компоновки пучка, и теплоотдача стабилизируется.

При расчете теплообменных аппаратов обычно используется средний по периметру трубы коэффициент теплоотдачи, который определяется для третьего и последующих рядов по эмпирическому критериальному уравнению

$$Nu_{\text{ж}} = c Re_{\text{ж}}^n Pr_{\text{ж}}^{0.33} (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{с}})^{0.25} \varepsilon_s, \quad (1)$$

где $c = 0,41$, $n = 0,6$ – для шахматных пучков;

$c = 0,28$, $n = 0,6$ – для коридорных пучков;

$Pr_{\text{ж}}$ и $Pr_{\text{с}}$ – числа Прандтля, принимаемые по табл. 1, при температуре потока воздуха и при температуре стенки трубки, соответственно;

ε_s – коэффициент, учитывающий влияние на интенсивность теплоотдачи поперечного S_1 и продольного S_2 шагов труб (рис.2).

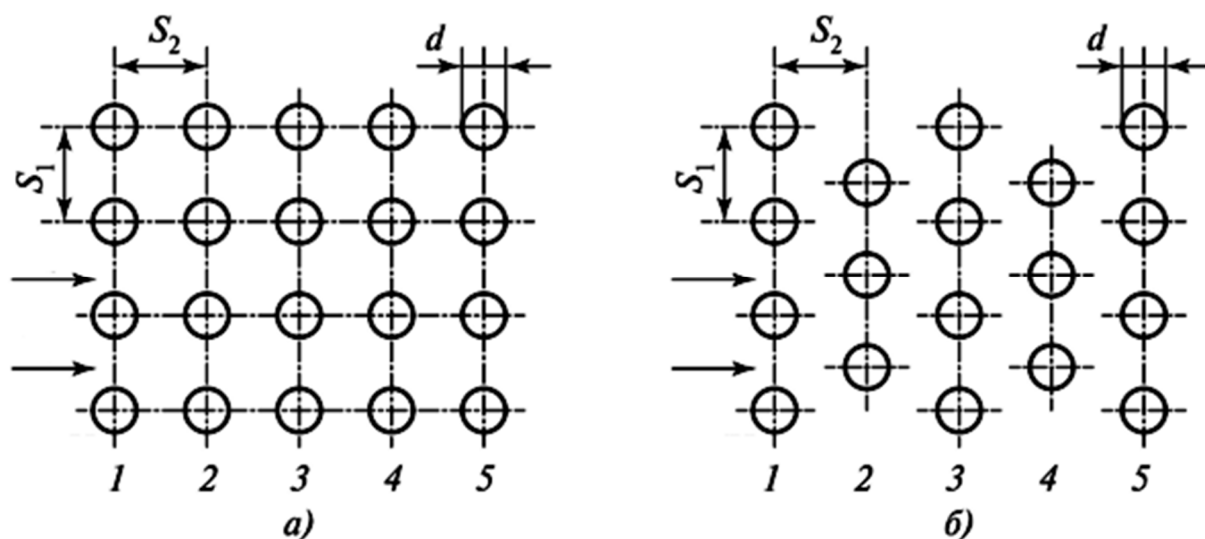


Рис. 2. Схема расположения труб для коридорного (а) и шахматного (б) пучков

Таблица 1

Физические параметры сухого воздуха

$t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2,$ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\nu \cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	Pr
10	2,51	14,16	0,705
20	2,59	15,06	0,703
30	2,67	16,00	0,701
40	2,76	16,96	0,699
50	2,83	17,95	0,697
60	2,90	18,97	0,696
70	2,96	20,02	0,694
80	3,05	21,09	0,692

Для коридорного пучка $\varepsilon_s = (S_2/d)^{-0.15}$; для шахматного – $\varepsilon_s = (S_1/S_2)^{1/6}$

при $(S_1/S_2) < 2$, $\varepsilon_s = 1,12$ при $(S_1/S_2) \geq 2$.

Критерий Рейнольдса рассчитывается по формуле

$$\text{Re}_{\text{ж}} = \omega^y d / \nu, \quad (2)$$

где ω^y – скорость потока в наиболее узком сечении пучка труб, м/с;

ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$ (табл.1 при температуре воздуха $t_{\text{в}}$);

d – наружный диаметр труб, м.

Определяемый по формуле (1) критерий Нуссельта является безразмерным коэффициентом теплоотдачи и рассчитывается по выражению

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = (\alpha \cdot d) / \lambda, \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя (в настоящей работе воздуха), $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Экспериментально исследовать зависимость коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления пучка труб от скорости движения теплоносителя.

2. Сравнить опытные данные с расчетными.

ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. Основным ее элементом является модель теплообменника, расположенного в аэродинамической трубе. Поток воздуха создается с помощью вентилятора 9, на входном патрубке которого имеется регулирующий шибер. Теплообменник состоит из пучка труб диаметром 12 мм. Расположение труб в пучке коридорное, поперечный шаг между осями труб $S_1 = 24$ мм, продольный — $S_2 = 26$ мм, число труб в ряду $n = 8$.

Исследования теплоотдачи производится методом локального моделирования, для чего в одну из труб пятого ряда установлен электрический нагреватель 2. Мощность нагревателя измеряется при помощи амперметра 8 и вольтметра 1. Температура набегающего потока измеряется термометром, а скорость воздуха измеряется пневмометрической трубкой 3.

Температура наружной поверхности нагреваемой трубки контролируется термопарой 7, холодный спай которой помещается в термостат с тающим льдом 5. Измерение ЭДС термопары производится потенциометром 6. Переход от ЭДС термопары к значению температуры поверхности трубки t_c осуществляется с помощью градуировочного графика. Статический и динамический напоры, а также гидравлическое сопротивление пучка труб измеряются микроманометрами 4.

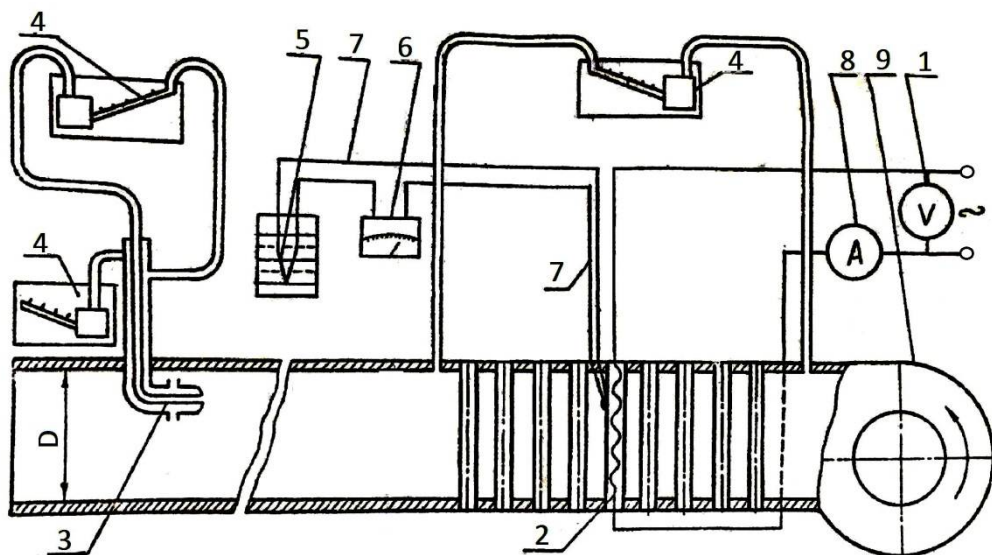


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

- 1 – вольтметр; 2 – нагреваемая трубка; 3 – пневмометрическая трубка;
4 – микроманометр; 5 – холодный спай термопары; 6 – потенциометр; 7 – термопара;
8 – амперметр; 9 – вентилятор

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для определения среднего по сечению трубы динамического напора воздуха пневмометрическая трубка последовательно устанавливается в пяти различных точках воздуховода.

Опыт проводится при трех положениях шиберов вентилятора: 1 – шибер полностью открыт; 2 – открыт примерно на 50 %; 3 – закрыт полностью. Все замеры производятся при установившемся тепловом режиме, когда температура стенки нагреваемой трубки больше не изменяется, то есть стрелка потенциометра перестает отклоняться. Результаты измерений вносятся в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений

Наименование величин	Обозначения	Единицы измерения	Значение величин в опыте		
			1	2	3
Сила тока нагревателя	I	А			
Напряжение нагревателя	U	В			
Динамические напоры	H_1 H_2 H_3 H_4 H_5	мм вод. ст.			
Средний динамический напор	$H_{ср}$	мм вод. ст.			
Статический напор	$P_{ст}$	мм вод. ст.			
Показания потенциометра	E	мВ			
Температура стенки	t_c	°С			
Температура воздуха	t_B	°С			
Барометрическое давление	P_B	Па			
Гидравлическое сопротивление пучка	ΔS	мм вод. ст.			

Обработка опытных данных производится в критериальном виде. Для вычисления значений критериев подобия необходимо рассчитать среднюю скорость потока в узком сечении пучка ω^y и коэффициент теплоотдачи конвекцией α .

Во всех применяемых ниже формулах следует обращать внимание на размерности величин: дифференциальные манометры, используемые в лаборатории, отградуированы в мм вод.ст., а в формулу (5) подставляются значения в Па (1 мм. вод. ст. = 1 кг/м² = 9,81 Н/м² (Па)).

Вначале определяется скорость потока воздуха за пучком, м/с, где установлена пневмометрическая трубка

$$\omega = \sqrt{\frac{2gH_{cp}}{\rho}}, \quad (4)$$

где H – динамический напор, мм.вод.ст.;

ρ – плотность воздуха, кг/м³, которая рассчитывается по формуле

$$\rho = \frac{\rho_0 T_0 P}{P_0 T}, \quad (5)$$

где $\rho_0 = 1,293$ кг/м³ – плотность воздуха при нормальных условиях, когда $P_0 = 101325$ Па, $T_0 = 273$ К; $T = (273 + t_B)$ – абсолютная температура воздуха, К; P – давление воздуха, Па.

$$P = P_6 + P_{ст}. \quad (6)$$

По уравнению неразрывности потока рассчитывается средняя скорость в пучке труб, м/с:

$$\omega^y = (\omega F)/F^y, \quad (7)$$

где $F = (\pi D^2)/4$ – площадь сечения трубы, в котором установлена пневмометрическая трубка, м², $D = 100$ мм;

$F^y = h(b - nd)$ – площадь узкого сечения в пучке труб, м²;

h – 160 мм – высота трубок;

b – 206 мм – ширина аэродинамической трубы;

n – число трубок в ряду;

d – 12 мм – диаметр трубок.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м² · К), для каждого режима вычисляется по формуле

$$\alpha = Q_k / F_{тр} (t_c - t_B), \quad (8)$$

где $F_{тр} = \pi dh$ – площадь поверхности нагреваемой трубки, м²;

Q_k – теплота, передаваемая конвекцией от трубки к потоку воздуха, Вт;

$$Q_k = Q - Q_l, \quad (9)$$

Q – тепловая мощность нагревателя трубки, Вт;

$$Q = JU, \quad (10)$$

где J – сила тока нагревателя, А;

U – напряжение нагревателя, В;

Q_l – теплота, передаваемая излучением, Вт;

$$Q_l = \varepsilon C_0 [(T_c/100)^4 - (T_b/100)^4], \quad (11)$$

где $\varepsilon = 0,6$ – степень черноты трубки;

$C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

T_c и T_b – абсолютные температуры поверхности стенки и воздуха, К.

Все расчетные данные вносятся в табл. 3. По результатам расчетов строятся графики зависимости $\alpha = f(\omega^y)$ и $\lg Nu_{ж} = f(\lg Re_{ж})$. На последний график (рис. 4) наносятся не только опытные точки, но и теоретическая прямая (по уравнению 1), для построения которой следует задаться двумя значениями критерия Рейнольдса (1000 и 10000).

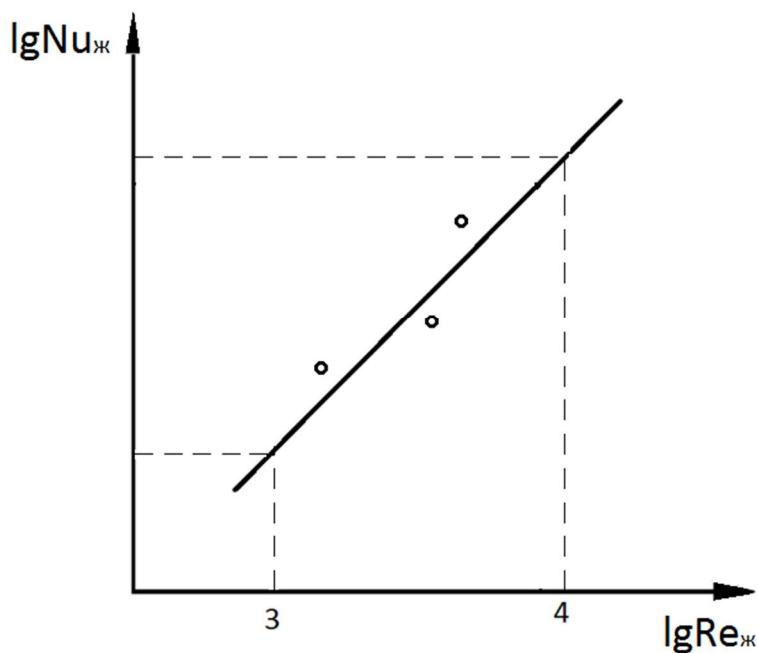


Рис. 4. Зависимость $Nu_{ж} = f(Re_{ж})$

Таблица 3

Результаты обработки опытных данных

Наименование величин	Обозначения	Единицы измерения	Значения величин в опытах		
			1	2	3
Плотность воздуха	ρ	кг/м ³			
Скорость воздуха за пучком	ω	м/с			
Скорость воздуха в пучке	ω^y	м/с			
Тепловой поток, передаваемый излучением	$Q_{\text{л}}$	Вт			
Тепловая мощность нагревателя	Q	Вт			
Тепловой поток, передаваемый конвекцией	$Q_{\text{к}}$	Вт			
Коэффициент теплоотдачи конвекцией	α	Вт/(м ² · К)			
Коэффициент кинематической вязкости	ν	м ² /с			
Число Рейнольдса	$Re_{\text{ж}} = \omega^y d / \nu$	—			
Коэффициент теплопроводности	λ	Вт/(м · К)			
Число Нуссельта	$Nu_{\text{ж}} = (\alpha \cdot d) / \lambda$	—			
Для построения графика рис. 4 рассчитать:	$\lg Re_{\text{ж}}$ $\lg Nu_{\text{ж}}$				

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе должен включать:

1. Наименование и цель работы;
2. Принципиальную схему установки;
3. Результаты измерений (табл. 2);
4. Результаты обработки опытных данных (табл. 3);
5. Вывод о влиянии скорости движения воздуха на интенсивность теплоотдачи.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется коэффициентом теплоотдачи?
2. Какова размерность коэффициента теплоотдачи?
3. Как меняется интенсивность теплоотдачи по периметру трубы?
4. Какова зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости набегающего потока и диаметра трубы?
5. Как рассчитываются критерии (числа) подобия?
6. Что является определяющим размером и определяющей температурой при нахождении критериев $Re_{\text{ж}}$ и $Nu_{\text{ж}}$?



**Ю.В. Путилин
С.В. Звягин
А.И. Сафронов**

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА В ПУЧКЕ ТРУБ

Екатеринбург
2020